干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.06.07

西北干旱半干旱区一次层状云系微物理特征分析①

王研峰[1]， 王 蓉[1]， 王聚杰[2,3]， 尹宪志[1]

（1 甘肃省人工影响天气办公室，甘肃 兰州 730020； 2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心，江苏 南京 210044； 3 南京信息工程大学管理工程学院，江苏 南京 210044）

摘 要： 利用西北干旱半干旱区一次飞机探测资料、卫星资料，分析了层状云微物理结构以及作业前后云微物理变化，结果表明：（1）此次层状云系垂直结构配置为冷暖两层，云层发展厚实。云的垂直和水平分布极不均匀。相对层积云，高层云小云粒子浓度低，大云粒子浓度高，液态含水量高。小云粒子浓度尤其是峰值区域与平均直径呈明显反相关。大于60个·cm^{-3}和35个·L^{-1}的小云、大云粒子浓度分别主要由3.5～10 μm、50～200 μm粒径段决定。（2）不同高度云粒子谱为单峰或双峰分布，总体呈单调递减趋势，但云形成和增长条件存在差异。强可播、不可播和可播性冷云粒子谱基本符合负幂指数的单调递减规律，云粒子浓度差异较大，自然冰晶浓度不可播云较高，可播云次之，强可播云较低。（3）作业后小云粒子浓度明显降低，在6.5～20 μm粒径段降低了2个量级左右，大云粒子浓度明显增加，谱宽增大，尤其在大于150 μm粒径段。

关 键 词： 西北干旱半干旱区；层状云；微物理结构；催化响应

云在全球和区域辐射能量收支和水分循环中起到极其重要的作用，云结构变化对天气和气候会产生重大的影响[1]。并且云宏微物理结构与降水和人工增雨关系密切，是云和降水研究的重点，因此研究云宏微物理结构特征对加深认识辐射能量收支、水循环过程、降水机制、以及提高人工增雨的科学性和有效性等方面具有重要意义[2-3]。

随着新的探测技术发展，国内外开展了大量云宏微观结构的研究，取得了一系列成果。ROSENFELD等[4]采用云顶温度和有效半径研究了云垂直结构。GRANT等[5]得出云顶温度在-10～24 ℃之间时具有可播性。封秋娟等[6]分析表明层状降水对应的液态含水量为0～0.42 g·m^{-3}。李仑格等[7]分析了青藏高原东部层状云结构。李照荣等[8]探讨了甘肃层状云微物理特征。孙玉稳等[9]研究表明河北地区高度为4 582 m的云层对应含水量≥0.1 g·m^{-3}，温度为-8.0 ℃，秋季适宜催化作业的小云粒子浓度为236.5个·cm^{-3}。

我国西北干旱半干旱区包括新疆、青海、宁夏、内蒙古西部、甘肃中西部及陕西西北部，降水稀少，年降水量低于400 mm[10]，近年来，在全球气候变暖背景下，植被破坏和水土流失严重，自然灾害频发使其生态环境更加脆弱，其生态环境的恢复和可持续发展一直是科学研究的热点[11]。人工增雨开发云水资源是维持西北干旱半干旱区生态环境可持续发展的有效手段之一，而层状云结构与降水关系密切，因此层状云结构与降水机制的研究是合理开发云水资源，改善生态环境的关键。王黎俊等[12-13]研究了三江源地区秋季典型层状云的微物理特性，表明层云中随着液态云粒子浓度降低，冰相含水量增大，催化效应随着过冷水含量增高越明显。但云的宏微物理结构特征在不同地区、不同天气系统下存在较明显的差异，为缓解西北干旱半干旱区水资源短缺，有必要对层状云的微物理结构开展更多深入系统的研究。

本文利用西北干旱半干旱区2007年8月23日飞机探测资料，结合云的宏观结构特征，详细分析了典型层状云的垂直和水平微物理结构变化，以及催

① **收稿日期：** 2019-03-02； **修订日期：** 2019-07-24
基金项目： 甘肃省气象局气象科研面上项目；国家自然科学基金面上项目（71971122）；甘肃省气象局创新团队（祁连山云水资源开发利用评估）；干旱气象科学研究基金项目（IAM201813）
作者简介： 王研峰（1986-），男，工程师，主要从事云物理降水和大气遥感研究. E-mail：wangyanfeng_1986@163.com
通讯作者： 王蓉. E-mail：13679418316@163.com

化后云微物理变化特征,对提高当地人工增雨的科学性和有效性,全球变暖背景下西北干旱半干旱区生态环境的改善提供一定的帮助。

1 研究区概况与方法

1.1 探测区域概况

飞机探测区域位于甘肃省中部地区,甘肃省中部地区深居内陆,地形封闭,处于黄土高原、内蒙古高原和青藏高原的过渡地带,地形起伏较大,属于干旱半干旱气候区。

1.2 仪器简介

探测仪器为安装在运-12 飞机机翼两侧 PMS 粒子测量系统,其中 FSSP-100(简称 FSSP)探头主要探测的云粒子范围为 2 ~ 47 μm,分辨率为 3 μm,中值直径 D_i = 3.5 ~ 45.5 μm(i = 1, …,15);OAP-2D-C 探头(简称 2DC)主要探测的云粒子范围为 25 ~ 800 μm,共有 15 个通道,其中第 1 ~ 14 通道的分辨率为 50 μm,第 15 通道的分辨率为 75 μm,中值直径 D_j = 50 ~ 762.5 μm(j = 1, …,15);由于云中未观测到降水粒子,OAP-2D-P 探头(简称 2DP)未取得资料。上述探头观测时间频率均为 1 s。飞机上还安装了用于观测相应时刻相对湿度、温度、高度、速度等资料的露点仪、温度计、GPS 定位仪等设备。

1.3 观测资料处理及云的界定

采用 PMS 探测资料对云区的定义有多种方法[8,14-15],结合考虑 FSSP 探测云粒子浓度和液态含水量,判定云出现的阈值为:FSSP 所测的云粒子浓度 $N_1 \geq 10$ 个·cm^{-3},计算的液态含水量 $LWC \geq 0.001$ g·m^{-3}。文中粒子浓度(N)、平均直径(D)、液态含水量(LWC)计算公式如下:

$$N = \sum_{i=1}^{n} N(D_i) \times \Delta D_i \tag{1}$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i \times N(D_i) \times \Delta D_i}{N} \tag{2}$$

$$LWC = \frac{\pi}{6} \times 10^{-6} \times \rho \sum_{i=1}^{n} D_i^3 \times N(D_i) \times \Delta D_i \tag{3}$$

式中:D_i 为 i 通道粒子的中值直径(μm);n 为通道数;$N(D_i)$ 为单位体积内 i 通道粒子的数浓度(个·cm^{-3}·μm^{-1});ρ 为液态水密度;LWC 由 FSSP 观测的数据计算所得(g·m^{-3})[16]。

本文 FSSP 所测云粒子浓度(小云粒子)和平均直径分别定义为 N_1、D_1,2DC 所测云粒子浓度(大云粒子)和平均直径分别定义为 N_2、D_2。

2 天气背景和飞机探测概况

2.1 天气背景

从 2007 年 8 月 23 日 08:00(北京时间,下同)500 hPa 高度场(图 1a)看出,高空槽位于贝湖至内蒙西部,甘肃省处于高空槽底西北气流中,有明显冷平流。对应时刻的 500 hPa 流场(图 1b)显示,高空槽控制的西北气流与副热带高压控制下的西南暖湿

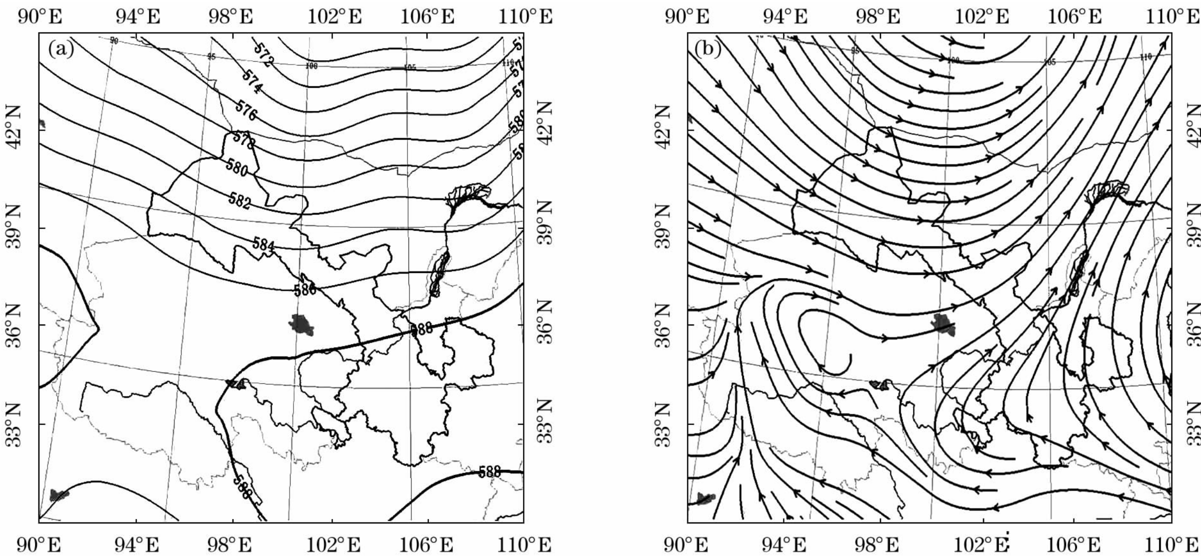


图 1 2007 年 8 月 23 日 08:00 的 500 hPa 高度场(a,单位:gpm)和流场(b,单位:m·s^{-1})

Fig. 1 500 hPa synoptic situation chart(a,Unit:gpm) and flow field (b,Unit:m·s^{-1}) at 08:00 on 23 August 2007

气流在甘肃省中部汇合影响该地区。结合地面天气图(图略),地面有冷锋影响甘肃省中部地区,甘肃省中部区域会出现一次明显的降水过程。

从2007年8月23日11:00和13:00红外云图可见(图2),甘肃上空受冷锋云系影响,云系为层状云结构,主体呈东北—西南带状分布,在缓慢向东南方向移动的过程中逐渐加强,甘肃南部地区有少许薄云,飞机探测区域(甘肃中部地区)位于云带上,云系以中低云为主。

2007年8月23日08:00～8月24日08:00,甘肃中部大部分区域和南部部分地区有降水(图3),甘肃中部区域24 h累计降水量为2～4 mm,位于探测区域的民勤、永昌、武威站24 h的累计降水量分别为1 mm、2 mm、3 mm。

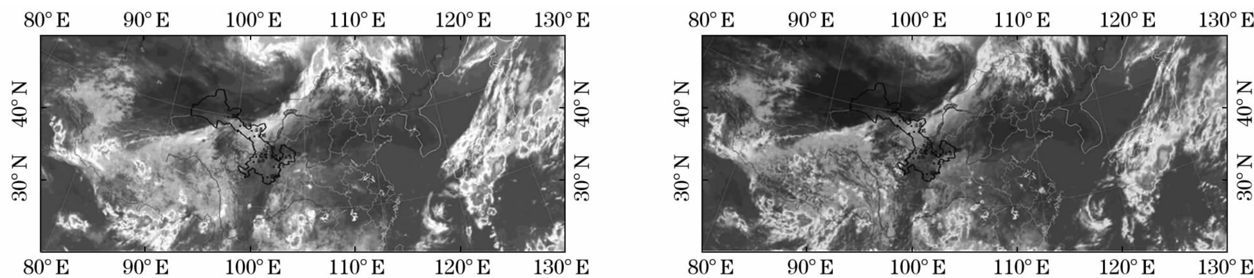


图2　2007年8月23日11:00(a)和13:00(b)FY-2红外云图

Fig. 2　FY-2 infrared cloud images at 11:00(a) and 13:00(b) on 23 August 2007

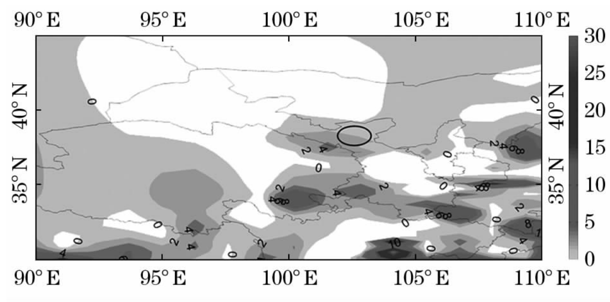


图3　2007年8月24日08:00 24 h地面累计降雨量(单位:mm;黑色线框为飞机探测区域)

Fig. 3　24 hours rainfall at 08:00 on 24 August 2007 (Unit:mm;the black line frame in the figure indicates approximate flight of aircraft)

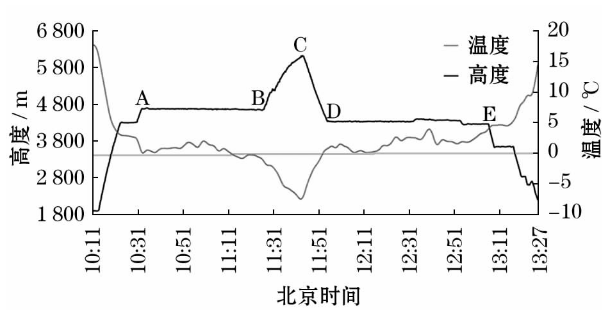


图4　飞机探测过程中高度和温度随时间的变化

Fig. 4　Aircraft observation process variations of flight height and temperature with time

2.2　飞机探测概况

飞机起飞前机场天气为阴,图4为飞行探测过程,从图中看出,飞机探测的航线是中川—景泰—武威—金昌—景泰—中川,10:11(北京时)飞机从中川机场起飞,到达景泰上空4 684 m(A点)后转为平飞,温度降至0 ℃;11:26到达金昌上空(B点)开始垂直探测,温度为－1 ℃;11:43(C点)开始下降;11:54(D点)开始平飞,温度为1.1 ℃;13:05(E点)准备下降;13:27落地。根据宏观观测记录,云系主要为As-Sc结构,下层为层积云(Sc),云层结构较松散,云中有零碎散云,高度约为3 000～4 650 m(海拔高度,下同),上层主要为高层云(As),高度约为4 650～6 200 m,云层结构密实。

在区分未受作业催化影响区和受作业影响区时,仅考虑环境风场的水平输送,不考虑催化剂的扩散和因核化可能引起的剂量衰减等复杂因素的影响[13]。综合08:00探空站资料和5 500 m左右飞机宏观记录的高空风向风速判断,飞机探测区域内风向为西南,风速为19 $m \cdot s^{-1}$,即飞机播撒作业后催化剂以19 $m \cdot s^{-1}$速度沿着风向方向输送扩散影响到下风方飞行轨迹。综合飞机飞行速度和催化剂扩散速度计算,飞机飞行至b1～b2时段时,受到上风方向轨迹a1～a2段播撒催化剂的影响,因此判断b1～b2段为作业影响时段,定义为受到作业催化影响时段(作业后),对应上风向a1～a2段为作业前探测时段,定义为未受到作业影响时段(作业前)(图5)。

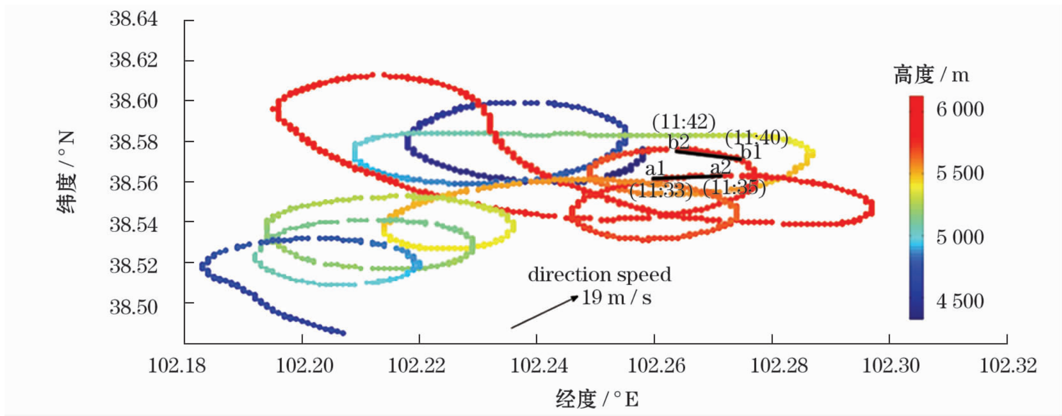


图 5　冷云中飞行轨迹随高度的演变

Fig. 5　Trajectory of the aircraft and flight height variation during the cold cloud experiment

3　云的微物理特征

3.1　云微物理的垂直分布特征

图 6 为云微物理量的垂直分布特征，可以看出，FSSP 和 2DC 观测到的粒子浓度垂直分布具有明显的不均匀性，云的垂直分布呈多峰分布（图 5a），云系垂直分布结构配置为冷暖两层，高层云为冷云，层积云为暖云，云层发展厚实，中间有薄的干层，符合催化—供给云物理结构[17]。0 ℃层高度约在 4 659 m 处，温度随高度增加递减（图 6a），对水汽向上输送以及云系发展更加有利。高层云 N_1 低于层积云，但 *LWC* 和 D_1 比层积云大（图 6b、6c、6d），有利于云滴的碰并增长和冰晶繁生，促进降水形成[18]，高层云中 N_1 在 10^2 个 · cm^{-3} 量级左右变化，D_1 在 10 μm 左右变化，层积云中 N_1 有较大起伏变化。*LWC* 随高度递增而增加，层积云中 *LWC* 在 0.03 g · m^{-3} 左右变化，高层云中 *LWC* 在 0.000 1 ~ 0.20 g · m^{-3} 之间变化，*LWC* 与 N_1 的变化趋势一致，说明 *LWC* 主要取决于较小云滴数浓度。3 800 ~ 4 100 m 有一干层，水汽不足。2DC 观测到雨层云中有不连续的大云滴存在，高层云中 N_2 和直径 D_2 均大于层积云，且高层云中 N_2 有较大起伏变化（图 6e、6f），说明高层云粒子在增长。在 0 ℃ 和接近云顶（−7.5 ℃）附近，N_1、N_2、*LWC* 均出现峰值，0 ℃ 附近分别为 447 个 · cm^{-3}、84.2 L^{-1}、0.1 g · m^{-3}，接近云顶分别为 193 cm^{-3}、93.3 L^{-1}、0.21 g · m^{-3}。

在不同高度云微物理特征的统计值中可见（表 1），高层云中FSSP所测浓度、直径和液态含水量平

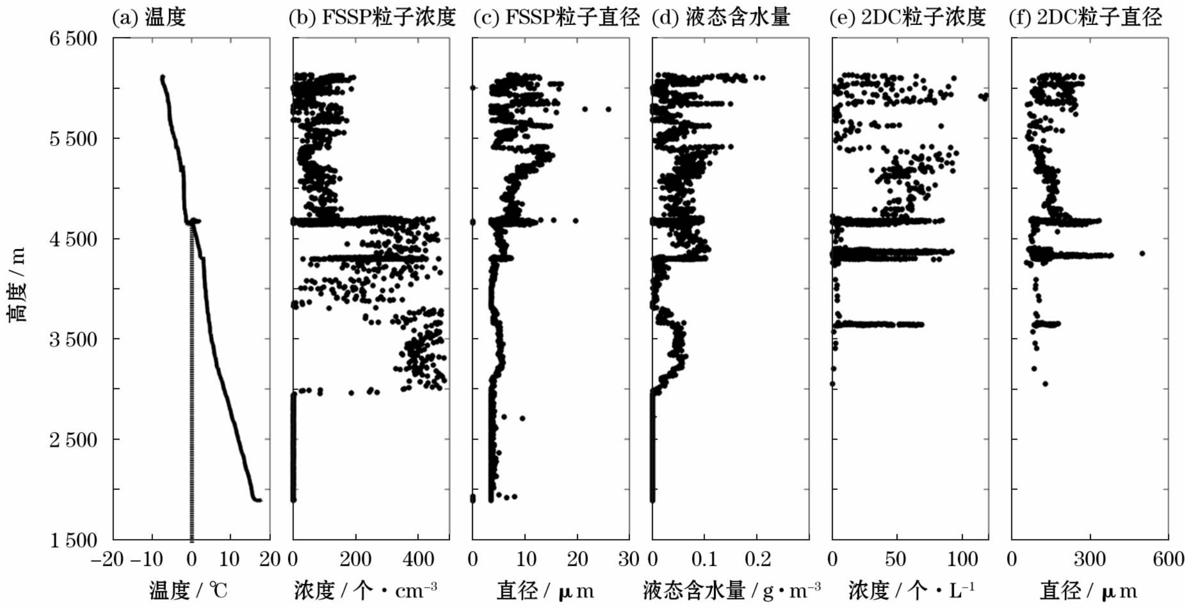


图 6　云微物理量的垂直分布

Fig. 6　Vertical distributions of cloud microphysical values

表 1　不同高度云微物理特征统计

Tab. 1　Statistics of the micro-physical parameters of different altitude stratiform clouds

云层	高度 / m	温度			FSSP-100			2DC	
		范围 / ℃	云底 / m	云顶 / m	N_1/个·cm^{-3}	D_1/μm	LWC/g·m^{-3}	N_2/个·L^{-1}	D_2/μm
层积云 (Sc)	2 955 ~ 4 656	0 ~ 8.61	3 000	4 650	0.05 ~ 483 (156)	3.5 ~ 19.7 (5.4)	0.000 1 ~ 0.108 (0.028)	0.242 ~ 84.2 (31.8)	72.73 ~ 335.0 (126.3)
高层云 (As)	4 656 ~ 6 129	-7.51 ~ 0	4 650	6 200	0.07 ~ 354.6 (99.2)	3.5 ~ 26 (7.9)	0.000 1 ~ 0.211 (0.043)	0.172 ~ 118 (40.4)	59.66 ~ 285.3 (168)

注:括号内数值为平均值

均值分别为 99.2 个·cm^{-3}、7.9 μm、0.043 g·m^{-3},最大值分别为 354.6 个·cm^{-3}、26 μm、0.211 g·m^{-3};层积云中平均值分别为 156 个·cm^{-3}、5.4 μm、0.028 g·m^{-3},最大值分别为 483 个·cm^{-3}、19.7 μm、0.108 g·m^{-3},浓度比高层云中高,液态含水量比高层云中低。2DC 观测到的粒子可能包括冰晶、霰粒子和大云滴,高层云中 N_2 和 D_2 均大于层积云,高层云中平均值分别为 40.4 个·L^{-1}、168 μm,最大值分别为 118 个·L^{-1}、285.3 μm,层积云中平均值分别为 31.8 个·L^{-1}、126.3 μm,最大值分别为 84.2 个·L^{-1}、335 μm。高层云温度范围为 -7.51 ~ 0 ℃,层积云温度范围为 0 ~ 8.61 ℃。

3.2　云粒子谱的垂直分布

云粒子的谱型变化反映了云中粒子增长过程及云的微物理特征[19],不同类型甚至同一云体各处云谱型特征存在差异。从云下部(图 7a)、云中部(图 7b)和云上部(图 7c)不同高度的平均粒子谱合成分布看出,所有粒子谱型特征主要为单峰或双峰分布,总体呈单调递减趋势,但不同高度云形成和增长条件存在差异。

云下部粒子谱型看出(图 7a),随着高度递增,云粒子浓度增加,谱增宽明显,主要体现在直径大于 30 μm 的粒径段,该层云上部和下部云粒子浓度最大相差近 2 个量级,在 3 000 m 左右,云粒子浓度在大粒径段出现第二个峰值,峰值出现在 200 μm 处。云中部(0 ℃层附近)粒子谱型看出(图 7b),该层云粒子浓度没有大的差异,云滴谱呈双峰分布,第二个峰值直径出现在 200 μm 处。云上部粒子谱型看出(图 7c),随着高度递增,云粒子浓度增加,谱增宽,该层云中上部和下部云粒子浓度最大相差近 2 个量级,云滴谱呈双峰分布,第二个峰值出现在 200 μm 处。在 >150 μm 粒子段云中、上部浓度量值接近。上述特征说明,云上部小云滴凝结增长较强、存在大云滴的碰并增长,由于接近As云云顶,上层云中落

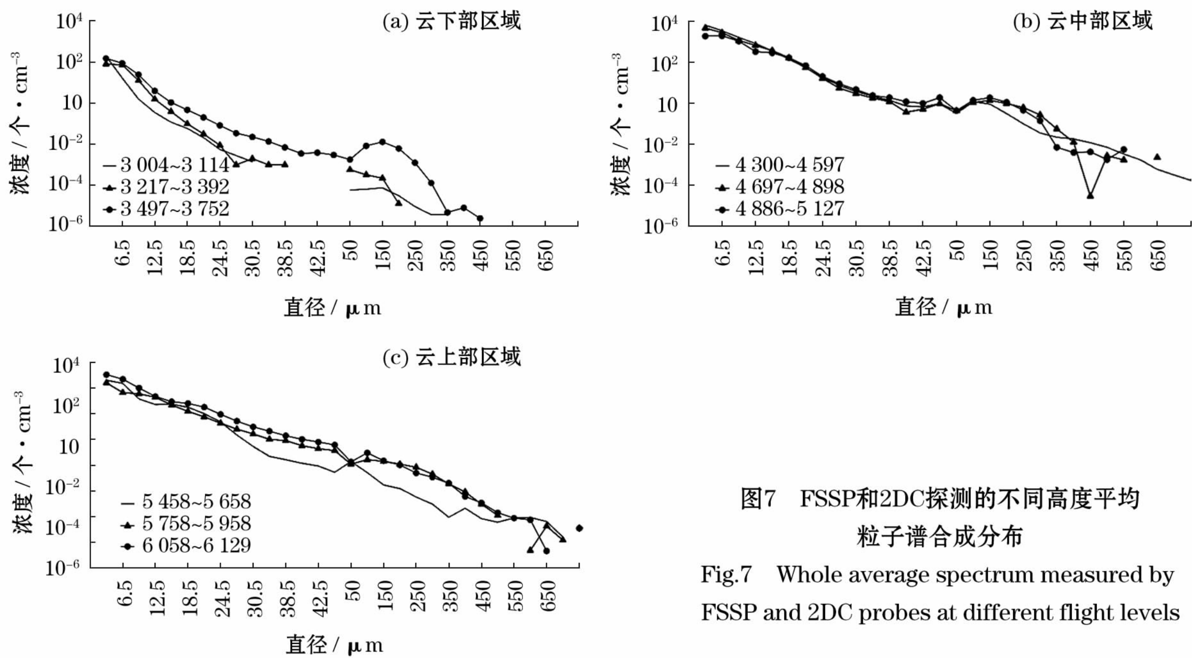


图7　FSSP和2DC探测的不同高度平均粒子谱合成分布

Fig.7　Whole average spectrum measured by FSSP and 2DC probes at different flight levels

下的冰相粒子融化会增加大云滴浓度。

3.3 云微物理量的水平分布特征

图 8 为飞机穿高层云平飞时不同高度处 FSSP、2DC 观测粒子浓度、平均直径和瞬时谱随时间变化，从图中看出，水平方向不同云区云粒子浓度和平均直径水平分布差异较大，粒子浓度存在明显的高、低值区，可见云的水平分布极不均匀。在 FSSP 的整个量程内云粒子浓度广泛分布，FSSP 所测云粒子浓度与粒子直径存在明显的反相关，尤其是 N_1 峰值区域。当 FSSP 所测云粒子浓度 $N_1>60$ 个·cm^{-3} 时，其在直径集中在 3.5~10 μm 范围内有 102 个·cm^{-3} 量级的高值区（图 8a、8c），说明 $N_1>60$ 个·cm^{-3} 的高浓度小云粒子主要由 3.5~10 μm 粒径段决定。2DC 所测云粒子浓度在平飞过程存在明显的高、低值区，当 $N_2>35$ 个·L^{-1} 时，其在直径集中在 50~200 μm 范围内有 102 个·L^{-1} 量级的高值区（图 8b、8d），说明 $N_2>35$ 个·L^{-1} 的高浓度大云粒子主要由 50~200 μm 粒径段决定。

图 8a、8b 中，粒子浓度变化起伏相对较小，特别是 2DC 观测的粒子浓度波动较小，N_1 主要集中在 50~130 个·cm^{-3}，N_2 主要集中在 160~240 个·L^{-1}。云粒子平均直径变化不大，D_1 在 8 μm 上下浮动，D_2 在 150 μm 上下浮动。图 8c、8d 中，粒子浓度和直径起伏变化较大，可能原因为该区域接近云顶，存在较多的冰相粒子，N_1 在 0.1~180 个·cm^{-3} 之间波动，最大浓度为 186 个·cm^{-3}（图 8c），N_2 在 0.1~310 个·L^{-1} 之间波动变化，最大浓度为 313 个·L^{-1}（图 8d）。D_1 在 3~18 μm 之间波动，D_2 在 70~270 μm 之间波动。

3.4 云可播性粒子谱分析

在综合前人对云可播性研究的基础上[20-21]，对此次高层冷云平飞探测的云粒子谱进行分析。云粒子谱反映了云粒子浓度和尺度的相互关系，不同类型的云在滴谱特征上差异明显，同一云体不同部位云滴谱差异也较大[19,22]。选取典型时刻对强可播、不可播和可播性云区粒子谱的合成进行对比分析

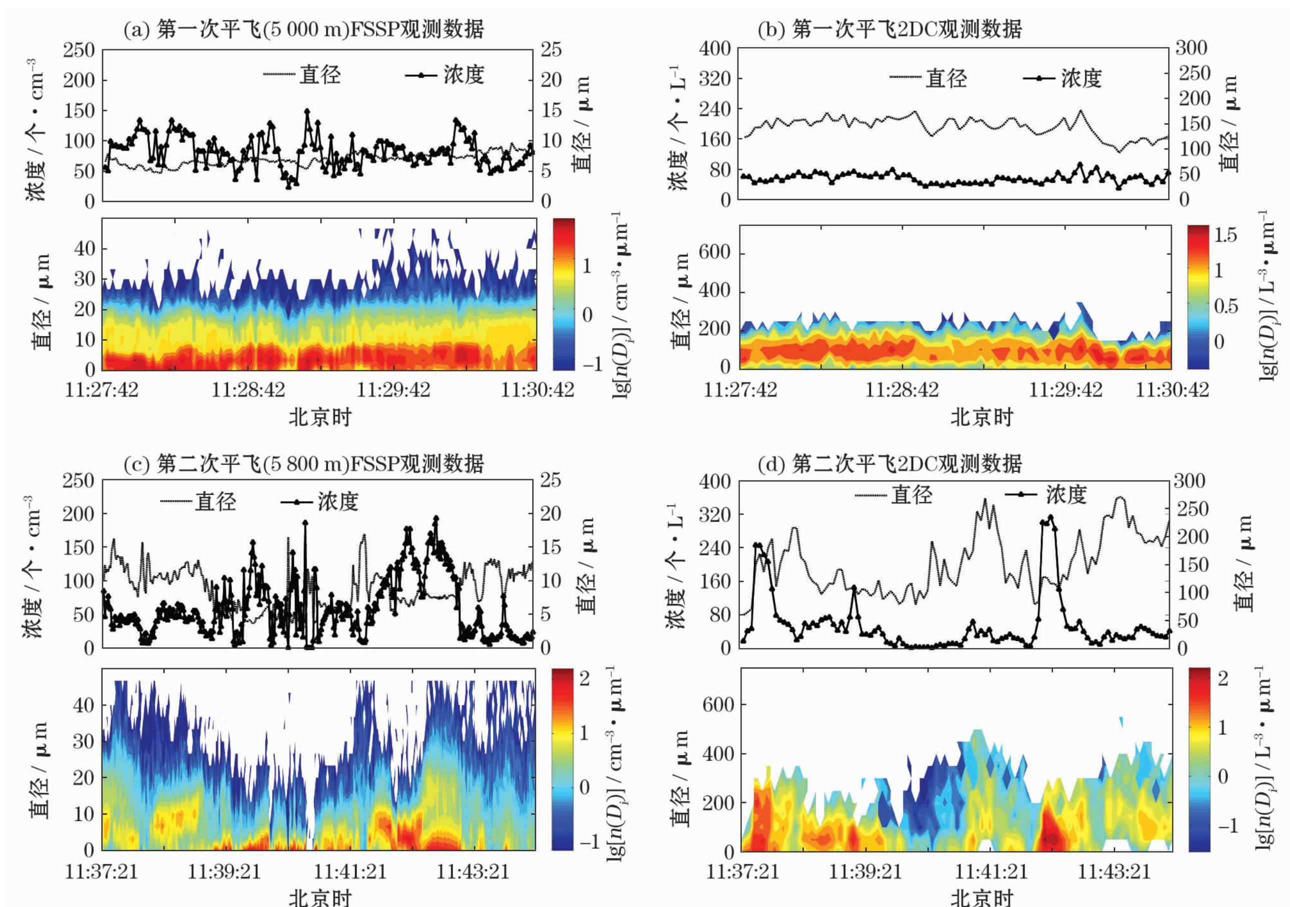


图 8 飞机不同高度平飞时 FSSP、2DC 观测粒子浓度、平均直径和瞬时谱随时间变化

Fig. 8 Observation data with time of cloud total concentration and mean diameter by using FSSP and 2DC and instantaneous spectrum at different level flight phases

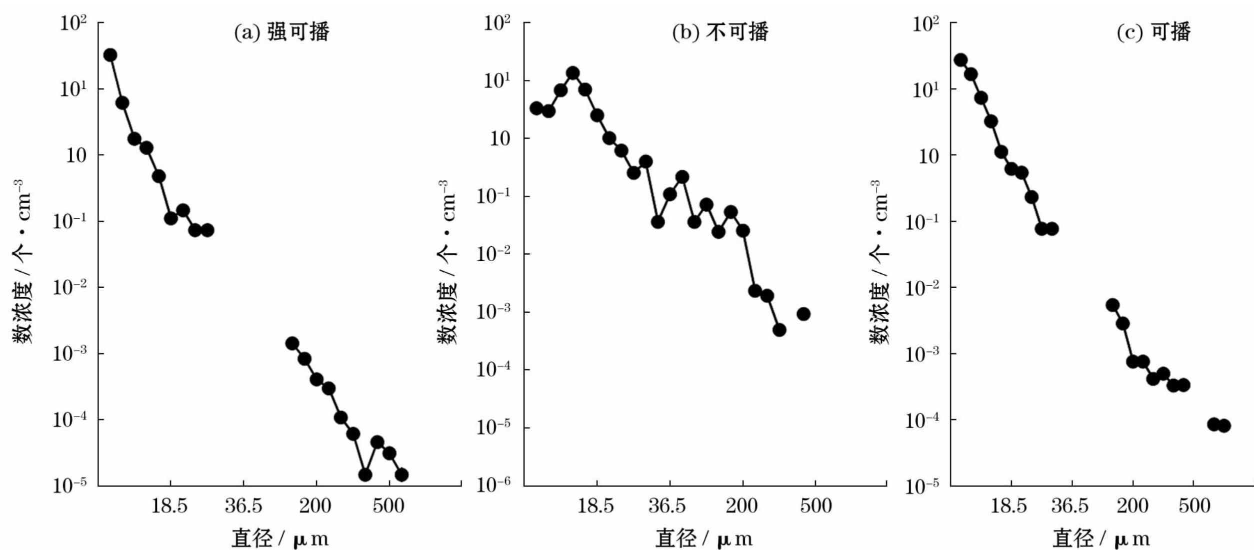


图 9　典型时刻云粒子谱合成分布

Fig. 9　Distribution of cloud droplet spectrums at typical time

(图 9),总体看粒子谱基本符合负幂指数的单调递减规律,但云粒子浓度差异较大。强可播云区(图 9a)小云粒子浓度高大云粒子小,FSSP 所测谱浓度的最大值为 33 个 · cm^{-3}、2DC 所测谱浓度最大值仅为 1.4 个 · L^{-1},说明云中自然冰晶浓度较低。可播云区(图 9c)小云粒子浓度高大云粒子也较小,FSSP 所测谱浓度的最大值为 26 个 · cm^{-3}、2DC 所测谱浓度最大值为 10 个 · L^{-1},表明云中自然冰晶浓度并不低。不可播云区(图 9b)小云粒子少大云粒子浓度高,FSSP 所测谱浓度的最大值仅为 6.9 个 · cm^{-3}、2DC 所测谱浓度最大值达到 54 个 · L^{-1},表明云中自然冰晶浓度较高。

3.5　作业前后云微物理特征响应

作业前、后云粒子谱的变化是表征催化有无效果的直接证据,也是检验作业效果的重要方法之一[12,23-24]。图 10 给出了作业前(a1 ~ a2 段)、后(b1 ~ b2 段)云粒子谱合成的对比,从图中看出,作业前、后粒子谱分布特征变化不大,呈单调递减趋势。作业后小云粒子浓度明显降低,主要体现在小粒径段,尤其是在 6.5 ~ 20 μm 区间的云粒子浓度降低了 2 个量级左右,最大浓度由 14.4 个 · cm^{-3} 降低至 0.7 个 · cm^{-3}。作业后大云粒子浓度增加,尤其直径 > 150 μm 的大云粒子浓度明显高于催化作业前,谱增宽明显。以上讨论说明,作业后云中小云粒子浓度明显降低,直径 > 150 μm 的大云粒子浓度增加明显,谱宽增大。

表 2 为作业前后不同时段云粒子浓度及平均直径。从表中看出,总体上作业后小云粒子浓度 N_1 明显减少,大云粒子浓度 N_2 增加,平均直径(D_1 和 D_2)均增大。小云粒子浓度 N_1 在作业前 a1 ~ a2 段平均值为 48.15 个 · cm^{-3},远高于作业后 b1 ~ b2 段平均值(11.19 个 · cm^{-3}),平均直径 D_1 增大为 13.21 μm。2DC 探测的大粒子浓度 N_2 在作业前 a1 ~ a2 段平均值为 55.7 个 · cm^{-3},低于作业后 b1 ~ b2 段平均值(69.8 个 · cm^{-3}),平均直径 D_2 增

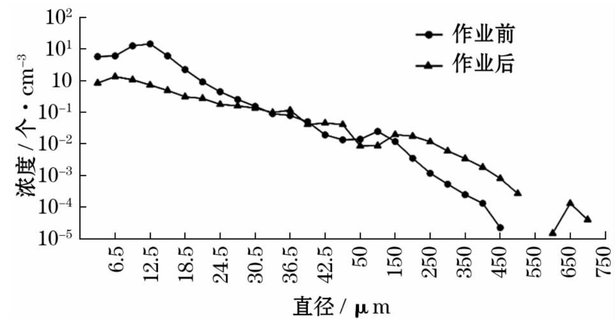


图 10　作业前和作业后云粒子谱分布

Fig. 10　Distribution of cloud droplet spectrums during the probe and the seeding period

表 2　作业前后不同时段探测的云粒子浓度及粒径对比

Tab. 2　Comparison of concentration and diameter of cloud droplet during the probe and the seeding period

时段		FSSP		2DC	
		N_1 /个 · cm^{-3}	D_1 /μm	N_2 /个 · cm^{-3}	D_2 /μm
探测时段 a1 ~ a2	11:33 ~ 11:35	48.15	11.15	55.7	110.3
影响时段 b1 ~ b2	11:40 ~ 11:42	11.19	13.21	69.8	216.2

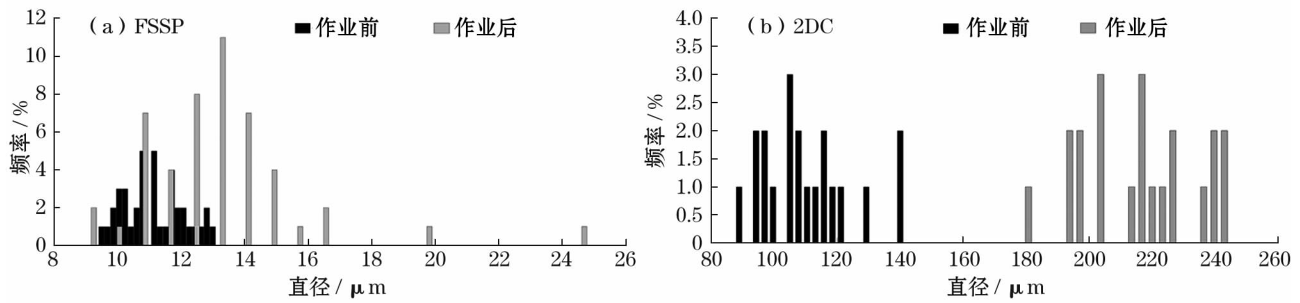


图 11　作业前后云粒子直径频率分布

Fig. 11　Frequency distribution of cloud particle diameters during the probe and the seeding periods

加为 216.2 μm。这说明作业后大云粒子浓度通过贝吉龙过程消耗过冷水长大,形成大量冰晶,使得浓度增加,同时导致小云粒子浓度蒸发减少[25-28]。

平均直径表示云粒子的大致尺度,为研究作业对云粒子直径的影响,计算了作业前、后同一云区云粒子平均直径的频率分布(图 11),看出作业前 FSSP 所测云粒子平均直径主要集中在 9~13 μm 粒径段,作业后 FSSP 所测小云粒子平均直径向大值方向偏移,频谱变宽,分布较离散,平均直径在 11~15 μm 的粒子占比 84.6%(图 11a)。作业前 2DC 所测云粒子平均直径集中在 90~140 μm 的粒径段,作业后 2DC 所测云粒子平均直径比催化前明显变大,频谱变宽,集中在 180~245 μm 的粒径段(图 11b)。

4　结 论

本文利用西北干旱半干旱区飞机探测资料,分析了典型层状云的垂直和水平微物理结构变化,以及催化后云微物理变化特征。主要结论如下:

(1) 此次层状云系垂直结构配置为冷暖两层,云层发展厚实,云垂直分布和水平分布极不均匀。高层云中小云粒子浓度低,液态含水量高,有利于云滴的碰并增长和冰晶繁生,促进降水形成,小云粒子浓度、直径和液态含水量分别为 99.2 个·cm^{-3}、7.9 μm、0.043 g·m^{-3};层积云中分别为 156 个·cm^{-3}、5.4 μm、0.028 g·m^{-3}。高层云中大云粒子浓度和直径均大于层积云,分别为 40.4 个·L^{-1}、168 μm,层积云中分别为 31.8 个·L^{-1}、126.3 μm。小云粒子浓度尤其是峰值区域与粒子直径存在明显的反相关。$N_1>60$ 个·cm^{-3} 和 $N_2>35$ 个·L^{-1} 的小云、大云粒子浓度分别主要由 3.5~10 μm、50~200 μm 粒径段决定。

(2) 不同高度云中云粒子谱型特征主要为单峰或双峰分布,总体呈单调递减趋势,但云形成和增长条件存在差异。云下部和上部随着高度递增,云粒子浓度增加,谱增宽明显,云中部粒子浓度差异没有大的差异,粒子谱差异不明显。强可播、不可播和可播性冷云区粒子谱基本符合负幂指数的单调递减规律,但云粒子浓度差异较大。

(3) 作业后小云粒子浓度明显降低,在 6.5~20 μm 的小粒径段降低了 2 个量级左右,大云粒子浓度增加,直径 >150 μm 的大云粒子浓度增加明显,谱宽增大。从频谱看,作业后小云和大云粒子平均直径向大值方向偏移,频谱变宽。

与以往针对西北干旱半干旱区的云微物理特征研究不同,本文系统详细分析了西北干旱半干旱区典型层状云的垂直和水平微物理结构变化,以及催化后云微物理变化特征,对科学定性评估西北干旱半干旱区飞机人工增雨效果提供一定的科学依据,为下一步该地区开展云降水机制及人工增雨的效果评估研究提供了有力支撑,也为全球变暖背景下西北干旱半干旱区人工影响天气工作和防灾减灾提供一定的帮助。

参考文献(References)

[1]　刘洪利,朱文琴,宜树华,等. 中国地区云的气候特征分析[J]. 气象学报,2003,61(4):466-473. [LIU Hongli, ZHU Wenqin, YI Shuhua, et al. Climatic analysis of the cloud over China[J]. Acta Meteorologica Sinica,2003,61(4):466-473.]

[2]　周毓荃,蔡淼,欧建军,等. 云特征参数与降水相关性的研究[J]. 大气科学学报,2011,34(6):641-652. [ZHOU Yuquan, CAI Miao, OU Jianjun, et al. Correlation between cloud characteristic parameters and precipitation[J]. Transactions of Atmospheric Science,2011,34(6):641-652.]

[3]　郭学良,付丹红,胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008—2012 年)[J]. 大气科学,2013,37(2):351-363.

[GUO Xueliang, FU Danhong, HU Zhaoxia. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008—2012[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2013,37(2):351-363.]

[4] ROSENFELD D,GUTMAN G. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data[J]. Atmospheric Research,1994,34: 259-283.

[5] GRANT L O,ELLIOTT R E. The cloud seeding temperature window[J]. Journal of Applied Meteorology,1974,13(3):355-363.

[6] 封秋娟,李培仁,侯团结,等. 山西春季一次层状冷云的微物理结构特征[J]. 大气科学学报,2014,37(4):449-456. [FENG Qiujuan,LI Peiren,HOU Tuanjie,et al. Microphysical characteristics of spring precipitation clod stratifform clouds in Shanxi Province[J]. Journal of Atmospheric Sciences,2014(4):449-456.]

[7] 李仑格,德力格尔. 高原东部春季降水云层的微物理特征分析[J]. 高原气象,2001,20(2):191-196. [LI Lunge,DE Ligeer. Analyses of microphysical features for spring precipitation cloud layers in east of Qinghai[J]. Plateau Meteorology,2001,20(2):191-196.]

[8] 李照荣,李荣庆,李宝梓. 兰州地区秋季层状云垂直微物理特征分析[J]. 高原气象,2003,22(6):583-589. [LI Zhaorong, LI Rongqing,LI Baozi. Analyses on vertical microphysical characteristics of autumn stratiform cloud in Lanzhou region[J]. Plateau Meteorology,2003,22(6):583-589.]

[9] 孙玉稳,李宝东,刘伟,等. 河北秋季层状云物理结构及适播性分析[J]. 高原气象,2015,34(1):237-250. [SUN Yuwen,LI Baodong,LIU Wei,et al. Study on physical structure of Hebei stratiform clouds in autumn and its seed ability condition[J]. Plateau Meteorology,2015,34(1):237-250.]

[10] 韩凤霞,邢大韦. 西北干旱区的水环境问题[J]. 干旱区地理,1993,16(4):45-50. [HAN Fengxia,XING Dawei. Water environmental problems in the arid and semiarid regions of northwest China[J]. Arid Land Geography,1993,16(4):45-50.]

[11] 赵雪雁,王亚茹,张钦,等. 近 50 a 青藏高原东部夏半年强降水事件的气候特征[J]. 干旱区地理,2015,38(4):675-683. [ZHAO Xueyan,WANG Yaru,ZHANG Qin,et al. Climatic characteristics of heavy precipitation events during summer half year over the eastern Tibetan Plateau in recent 50 years[J]. Arid Land Geography,2015,38(4): 675-683.]

[12] 王黎俊,银燕,姚展予,等. 三江源地区秋季一次层积云飞机人工增雨催化试验的微物理响应[J]. 气象学报,2013,71(5):925-939. [WANG Lijun,YIN Yan,YAO Zhanyu,et al. Microphysical responses as seen in a stratocumulus aircraft seeding experiment in autumn over the Sanjiangyuan National Nature Reserve[J]. Acta Meteoro Sinica,2013,71(5):925-939.]

[13] 王黎俊,银燕,李仑格,等. 三江源地区秋季典型多层层状云系的飞机观测分析[J]. 大气科学,2013,37(5):1038-1058. [WANG Lijun,YIN Yan,LI Lunge,et al. Analyses on typical autumn multi-layer stratiform clouds over the Sanjiangyuan National Nature Reserve with airborne observations[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2013,37(5):1038-1058.]

[14] MILES N L,VERLINDE J,CLOTHIAUX E E. Cloud droplet size distributions in low-level stratiform clouds [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,2000,57: 295-311.

[15] 张瑜,银燕,石立新,等. 2007 年秋季河北地区云微物理结构的飞机探测分析[J]. 高原气象,2012,31(2):530-537. [ZHANG Yu,YIN Yan,SHI Lixing,et al. Analysis of microphysical structure over Hebei region during autumn of 2007[J]. Plateau Meteorology,2012,31(2):530-537.]

[16] 党娟,王广河,刘卫国. 甘肃省夏季层状云微物理特征个例分析[J]. 气象,2009,35(1):24-36. [DANG Juan,WANG Guanghe,LIU Weiguo. A case analysis on microphysical characteristics of summer stratiform cloud in Gansu Province[J]. Meteor Mon,35(1):24-36.]

[17] 游来光,马培民,胡志晋. 北京层状云人工降水试验研究[J]. 气象科技,2002,30(增刊):19-63. [YOU Laiguang,MA Peimin,HU Zhijin. The stratiform cloud artificial rainfall experiments in Beijing[J]. Meteorology Science and Technology,2002,30(suppl.):19-63.]

[18] 项磊. 宁夏层状云宏观微观物理特征综合分析[D]. 南京:南京信息工程大学,2007. [XIANG Lei. Analysis of the micro-physical characteristics of stratiform clouds in NingXia[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology,2007.]

[19] 樊鹏,余兴. 陕甘宁人工增雨技术开发研究[M]. 北京:气象出版社,2003. [FAN Peng,YU Xing. A study of development of artificial precipitation in the Shaanxi,Gansu and Ningxia[M]. Beijing:China Meteorological Press,2003.]

[20] 陶树旺,刘卫国,李念童,等. 层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究[J]. 应用气象学报,2001,12(增刊):14-22. [TAO Shuwang,LIU Weiguo,LI Niantong,et al. A study of real-time identification of seedability of cold stratiform clouds[J]. Journal of Applied Meterological Science,2001,12(suppl.):14-22.]

[21] 王研峰,黄武斌,和翠英,等. 陇中黄土高原一次秋季层状云微物理结构及适播性分析[J]. 干旱气象,2017,35(1):64-72. [WANG Yanfeng,HUANG Wubin,HE Cuiying,et al. Analysis on microphysical structure of stratiform clouds in autumn in Loess Plateau of middle Gansu[J]. Journal of Arid Meteorology,2017,35(1):64-72]

[22] 陶玥,洪延超. 云中粒子谱形状因子变化对云及降水影响的数值研究[J]. 气象学报,2007,65(2):221-230. [TAO Yue, HONG Yanchao. Numerical simulation of influence of drop size distribution shape on cloud and precipitation[J]. Acta Meteoro Sinica,2007,65(2):221-230.]

[23] 王以琳,雷恒池. 冷云飞机人工引晶检验[J]. 大气科学,2003,27(5):929-938. [WANG Yilin,LEI Hengchi. Test of cold cloud seeding[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2003,27(5):929-938,]

[24] 王旭,张嘉伟,马禹,等. 天山山脉强降水云宏微观物理属性的空间分布特征[J]. 干旱区地理,2016,39(6):1153-1161. [WANG Xu,ZHANG Jiawei,MA Yu,et al. Spacial distribution of macro and micro physical properties of clouds during heavy rains over Tianshan Mountains[J]. Arid Land Geography,2016,39(6):1153-1161.

[25] 秦彦硕,蔡淼,刘世玺,等. 华北秋季一次低槽冷锋积层混合云宏微物理特征与催化响应分析[J]. 气象学报,2017,75(5):

835 – 849. [QIN Yanshuo, CAI Miao, LIU Shixi, et al. Study on macro and microphysical structure and responses of an autumn trough cold-front convective-stratiform mixed cloud in north China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(5): 835 – 849.]

[26] 李斌,郑博华,兰文杰,等. 克拉玛依市冬季飞机人工增雪作业效果统计分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 686 – 692. [LI Bin, ZHENG Bohua, LAN Wenjie, et al. Statistical analysis of effect of aircraft artificial snowfall enhancement in winter at Karamay[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 686 – 692.]

[27] 常倬林,崔洋,张武,等. 基于 CERES 的宁夏空中云水资源特征及其增雨潜力研究[J]. 干旱区地理, 2015, 38(6): 1112 – 1120. [CHANG Zhuolin, CUI Yang, ZHANG Wu, et al. Characteristics and developing potential of cloud water resource in Ningxia with the CERES data[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(6): 1112 – 1120.]

[28] 陈亚宁,杨青,罗毅,等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1 – 9. [CHEN Yaning, YANG Qing, LUO Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China [J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1 – 9.

Cloud microphysical characteristics on a stratiform nephsystem in the arid and semi-arid regions of northwest China

WANG Yan-feng[1], WANG Rong[1], WANG Ju-jie[2,3], YIN Xian-zhi[1]

(1 *Gansu Weather Modification Office*, *Lanzhou* 730020, *Gansu*, *China*; 2 *College of Management Engineering*, *Nanjing University of Information and Science Technology*, *Nanjing* 210044, *Jiangsu*, *China*; 3 *School of Management Science and Engineering*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: In order to qualitatively evaluate the effect of the aircraft artificial rain enhancement in the arid and semi-arid regions of northwest China, the stratiform cloud microphysical structure and its changes before and after the seeding were analyzed by using observation data of an airborne detection, and satellite data. The results are summarized as follows: (1) The stratiform cloud contains a cold layer and a warm layer from the vertical structure perspective and the clouds were thick. The vertical and horizontal distribution of the cloud in the detection area are very uneven. Compared to stratocumulus cloud, the concentration of the small cloud particles in altostratus cloud is low, while the concentration of the large cloud particles is high and the liquid state water content is high. The concentration of the small cloud particles was negatively correlated with its average diameter, particularly in the peak regions. The concentration of small cloud particles greater than 60 individual · cm^{-3} and large cloud particles greater than 35 individual · L^{-1} depended mainly on the particles whose diameters ranged from 3.5 to 10 μm and from 50 to 200 μm, respectively. (2) The cloud particle spectrum with different heights follows unimodal or bimodal distributions, but shows a declining trend in general. There is difference in the cloud forming and developing. The particle spectrum of the strong seedable, not-seedable and seedable cold cloud basically accords with the monotone decreasing law of negative power exponent, but there are great difference in cloud particles concentration, with the not-seedable ice crystal cloud having the highest concentration, followed by those with seedable cloud, and the strong seedable cloud the lowest. (3) The concentration of the small cloud particles was significantly decreased after seeding, by about two orders of magnitude in the diameter range from 6.5 to 20 μm. The concentration of the large cloud particles was significantly increased after seeding, and the spectral width was expanded, especially in the diameter range larger than 150 μm.

Key words: arid and semi-arid regions of northwest China; stratiform cloud; microphysical structure; microphysical responses after seeding